



## Laboratorium układów elektronicznych

### Ćwiczenie 3

### Wzmacniacze mocy

#### Zagadnienia do przygotowania

- Podstawowe parametry wzmacniaczy mocy
- Budowa i zasada działania wzmacniacza klasy B (AB)
- Budowa i zasada działania wzmacniacza mocy klasy D
- Pojęcia:
  - zniekształcenia skrośne,
  - para komplementarna,
  - układ przeciwsobny,
  - układ mostkowy,
  - współczynnik wypełnienia przebiegu prostokątnego.

#### Literatura

- [1] M. Feszczuk, *Wzmacniacze elektroakustyczne*, WKŁ Warszawa, 1986r.
- [2] W. Golde, *Wzmacniacze tranzystorowe*, WNT Warszawa, 1967r.
- [3] Notatki do wykładu Analogowe i Cyfrowe Układy Elektroniczne 1.

## 1. Wprowadzenie

Pojęcie **wzmacniacz mocy** może odnosić się zarówno do pojedynczego układu elektronicznego (bloku, stopnia wzmacniającego) zawierającego jeden element aktywny, jak i do bardziej złożonego systemu zawierającego w swojej strukturze oprócz właściwego stopnia wzmacniającego pewną liczbę współpracujących z nim dodatkowych bloków funkcjonalnych. Zadaniem wzmacniacza mocy jest dostarczenie do obciążenia sygnału zapewniającego wydzielenie w tym obciążeniu (kosztem energii pobranej z zasilacza) pożądanej mocy elektrycznej. Proces przekazywania energii powinien charakteryzować się przy tym możliwie wysoką sprawnością, a sygnał elektryczny dostarczany do obciążenia powinien być możliwie najwierniejszym odtworzeniem sygnału wejściowego.

### 1.1. Podstawowe parametry wzmacniaczy mocy

Najważniejszymi parametrami charakteryzującymi wzmacniacze mocy są:

- współczynnik zniekształceń harmoniczných,
- współczynnik zniekształceń intermodulacyjnych,
- znamionowa moc wyjściowa,
- pasmo przenoszenia mocy,
- sprawność energetyczna.

#### Współczynnik zniekształceń harmoniczných, THD

Współczynnik zniekształceń harmoniczných (zawartości harmoniczných) THD (ang. *Total Harmonic Distortion*) jest parametrem opisującym liniowość wzmacniacza. Wartość współczynnika THD wyznacza się na podstawie wartości amplitud napięć o częstotliwościach harmoniczných występujących w sygnale wyjściowym wzmacniacza pobudzanego sygnałem sinusoidalnym. Współczynnik THD określa procentową zawartość w sygnale wyjściowym wzmacniacza składowych o częstotliwościach harmoniczných. Wartość współczynnika zniekształceń harmoniczných THD oblicza się według poniższej zależności:

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

gdzie:

$U_1$  - amplituda napięcia o częstotliwości równej częstotliwości sygnału pobudzającego,  
 $U_2...U_n$  - amplitudy napięć o częstotliwościach harmonicznyc (tj. o częstotliwościach będących całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości sygnału pobudzającego)

### Współczynnik zniekształceń harmonicznyc, THD+N

Współczynnik zniekształceń harmonicznyc THD+N (ang. *Total Harmonic Distortion plus Noise*) podobnie jak współczynnik THD jest parametrem opisującym liniowość wzmacniacza, ale zawiera również informacje o występujących w sygnale wyjściowym szumach. Współczynnik THD+N określa procentową zawartość w sygnale wyjściowym wzmacniacza składowyc o częstotliwościach harmonicznyc oraz szumów:

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2 + n}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

gdzie:

$U_1$  - amplituda napięcia o częstotliwości równej częstotliwości sygnału pobudzającego,  
 $U_2...U_n$  - amplitudy napięć o częstotliwościach harmonicznyc (tj. o częstotliwościach będących całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości sygnału pobudzającego)  
 $n$  - natężenie szumów,

### Współczynnik zniekształceń intermodulacyjnych

Współczynnik zniekształceń intermodulacyjnych wyznacza się w warunkach pobudzenia wzmacniacza dwoma sygnałami sinusoidalnymi o różnych częstotliwościach  $f_1$ ,  $f_2$ . Na skutek nieliniowości charakterystyki wzmocnienia badanego wzmacniacza w jego sygnale wyjściowym pojawią się składowe o częstotliwościach równyc sumie i różnicy częstotliwości sygnałów wejściowych. Wartość współczynnika zniekształceń intermodulacyjnych oblicza się według wzoru:

$$m = \frac{\sqrt{(U_{f_2-f_1} + U_{f_2+f_1})^2 + (U_{f_2+2f_1} + U_{f_2-2f_1})^2 + (U_{f_2+3f_1} + U_{f_2-3f_1})^2 + (U_{f_2+4f_1} + U_{f_2-4f_1})^2}}{U_{f_2}} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

gdzie:

$U_{f_2+f_1}$  - amplituda napięcia o częstotliwości równej  $f_2+f_1$  itd.

### Znamionowa moc wyjściowa

Jest to wartość mocy, którą wzmacniacz może wydzielić na znamionowej impedancji obciążenia przy danej częstotliwości (lub w danym paśmie częstotliwości), bez przekroczenia określonego współczynnika zniekształceń nieliniowych, w ciągu określonego czasu (np. 10 min według PN-74/T-06251/07). Definiuje się również **muzyczną moc wyjściową**, która określana jest przy chwilowym wystrojeniu wzmacniacza.

### Pasmo przenoszenia mocy

Pasmo przenoszenia mocy określone jest przedziałem częstotliwości, na którego krańcach moc wyjściowa spada o 3dB w stosunku do mocy znamionowej. Wewnątrz tego przedziału częstotliwości nie może nastąpić przekroczenie określonej wartości współczynnika zawartości harmoniczných.

### Sprawność energetyczna

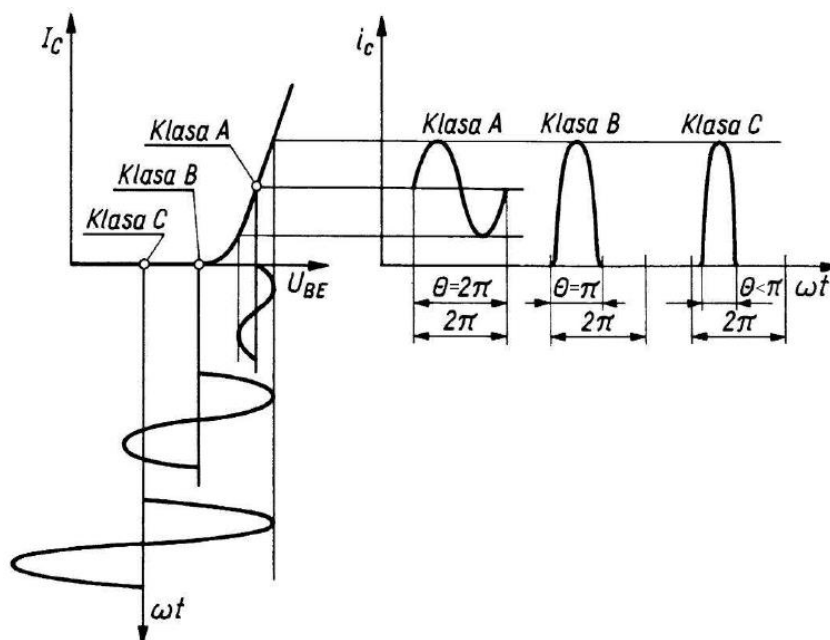
Sprawność energetyczna wzmacniacza określa się jako stosunek mocy  $P_o$  wydzielonej przez wzmacniacz w obciążeniu do mocy  $P_z$  pobranej przez niego z obwodów zasilających:

$$\eta = \frac{P_o}{P_z} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

Sprawność energetyczna wzmacniacza mocy wiąże się bezpośrednio z budową jego zasadniczego stopnia wzmacniającego - jest parametrem charakterystycznym dla pewnych grup rozwiązań układowych (klas wzmacniaczy mocy).

## 1.2. Klasy wzmacniaczy mocy (badanych w ćwiczeniu)

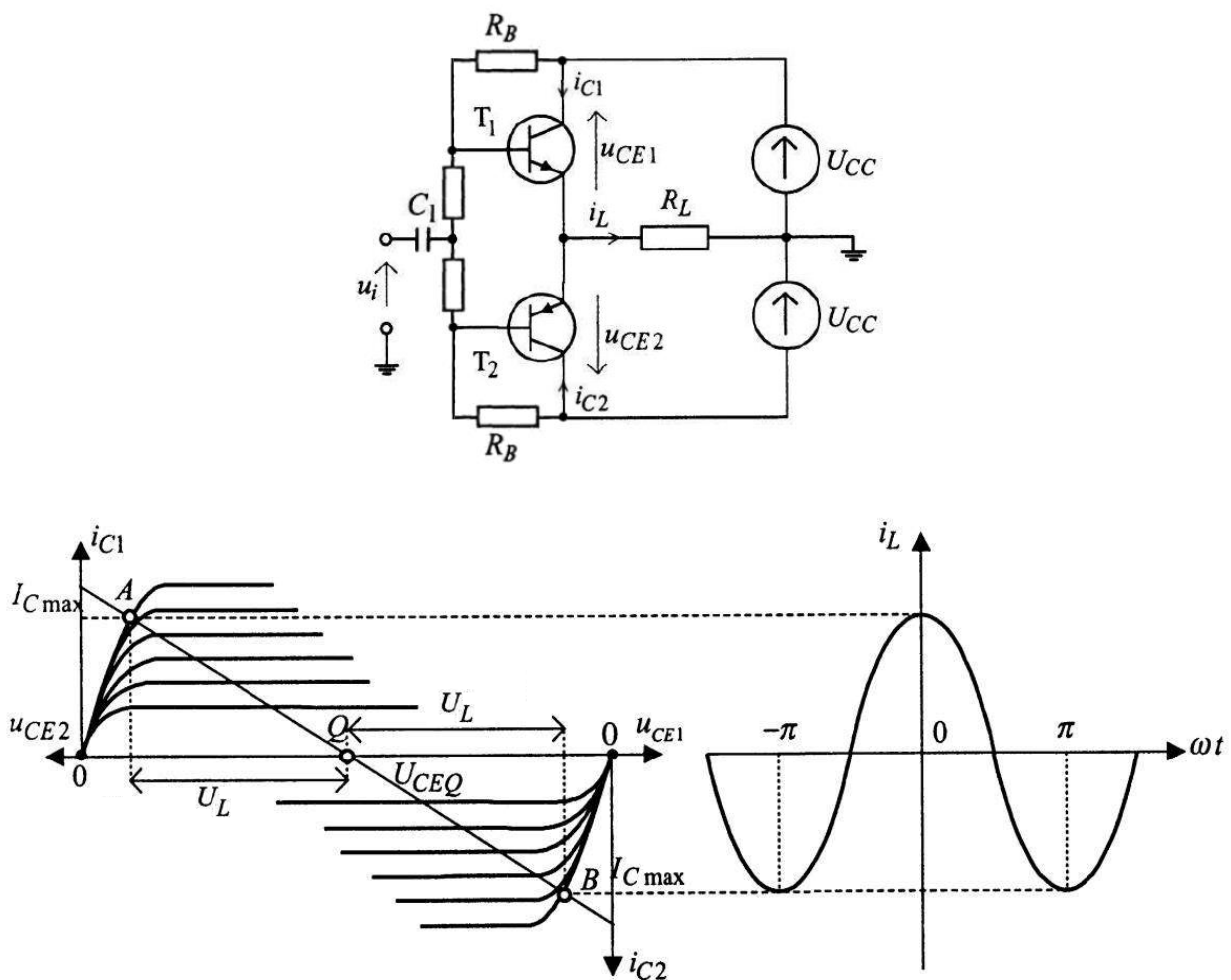
Podział wzmacniaczy mocy na klasy: A, B, C dokonany został według relacji pomiędzy sygnałem wyjściowym i wejściowym wzmacniacza mocy zawierającego jeden element aktywny. Jako podstawę tego podziału przyjęto tzw. **kąt przepływu prądu** nazywany również **kątem przewodzenia** i oznaczany symbolem  $\Theta$ . Wartość kąta przepływu prądu  $\Theta$  określana jest dla jednego okresu sygnału wejściowego na podstawie odcinka czasu, w którym element aktywny wzmacniacza mocy (lampa, tranzystor) znajduje się w stanie przewodzenia. Innymi słowy parametr ten określa, przez jaką część okresu sygnału wejściowego następuje przepływ prądu przez element aktywny (przepływ prądu wyjściowego wzmacniacza). Kąt przepływu prądu związany jest bezpośrednio ze stałoprądową polaryzacją elementu aktywnego (ustaleniem punktu pracy), co ilustruje rys.1. W związku z tym można powiedzieć, że poszczególne klasy wzmacniaczy zdefiniowane zostały na podstawie konstrukcji ich stopni mocy. Ponieważ dla niektórych nowych rozwiązań układowych wzmacniaczy mocy m.cz. (klasy D, T), a także wzmacniaczy rezonansowych (klasy E, F) wyznaczenie wartości kąta przepływu jest niejednoznaczne, dlatego też podział wzmacniaczy mocy na poszczególne klasy najlepiej jest kojarzyć jako klasyfikację według odmienności ich budowy.



Rys.1 Położenie spoczynkowego punktu pracy elementu aktywnego i jego wpływ na wartość kąta przepływu dla wzmacniaczy mocy klas: A, B, C [1]

### Klasa B

We wzmacniaczach klasy B kąt przepływu prądu  $\Theta$  wynosi  $\pi$ , co oznacza, że element aktywny stopnia mocy znajduje się w stanie przewodzenia tylko przez połowę okresu sygnału wejściowego (rys.1). Z tego powodu wzmacniacze mocy klasy B budowane są najczęściej jako tzw. **układy symetryczne (przeciwsobne)** zawierające dwa elementy aktywne, z których każdy znajduje się w stanie przewodzenia tylko w jednej połowie okresu sygnału wejściowego. W celu zapewnienia maksymalnie symetrycznej pracy wzmacniacza stosowane są tzw. **pary komplementarne**, czyli tranzystory o identycznych parametrach elektrycznych, ale różniące się typem przewodnictwa. Rys.2 przedstawia uproszczony schemat ideowy oraz charakterystyki robocze przeciwsobnego wzmacniacza klasy B zbudowanego przy wykorzystaniu tranzystorów bipolarnych.



Rys.2 Uproszczony schemat ideowy oraz charakterystyki robocze przeciwsobnego wzmacniacza mocy klasy B [2]

Maksymalna amplituda napięcia wyjściowego  $U_L$  ograniczona jest możliwością wejścia tranzystorów w stan nasycenia i wynosi  $U_L = U_{CC} - U_{CEsat}$ . W tych warunkach amplituda

prądu wyjściowego  $I_L$  wynosi  $U_{CC}/R_L$  i powinna być mniejsza niż maksymalny dopuszczalny prąd kolektora  $I_{Cmax}$  tranzystorów. Moc dostarczana do obciążenia w warunkach pełnego wysterowania wynosi:

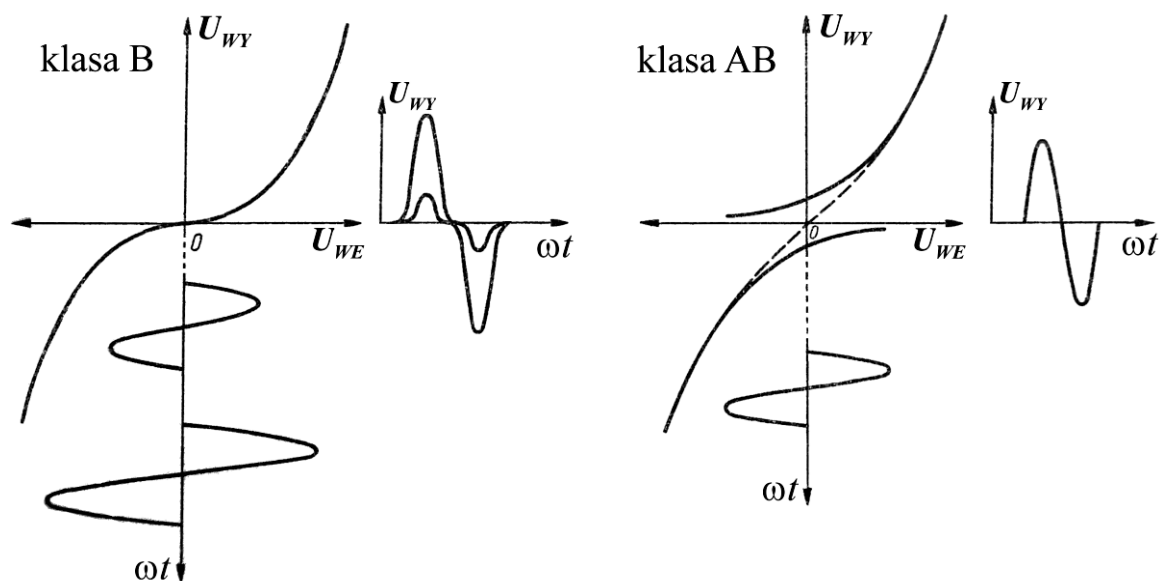
$$P_O = P_L = \frac{I_L}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_L}{\sqrt{2}} \approx \frac{R_L}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{CC}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \frac{U_{CC}^2}{R_L} \quad (3.5)$$

Moc pobierana przez wzmacniacz z obwodów zasilania w trakcie jednego półokresu sygnału wynosi  $U_{CC} \cdot I_{Lsr}$ , gdzie  $I_{Lsr}$  jest średnią wartością (sinusoidalnego) prądu obciążenia. W warunkach pełnego wysterowania moc pobierana przez omawiany układ określona jest następująco:

$$P_Z = 2 \cdot U_{CC} \cdot I_{Lsr} \approx 2U_{CC} \cdot \frac{U_{CC}}{\pi} \cdot \frac{R_L}{\pi \cdot R_L} = \frac{2U_{CC}^2}{\pi \cdot R_L} \quad (3.6)$$

Wobec powyższych zależności teoretyczna sprawność energetyczna przeciwobnego wzmacniacza mocy klasy B pracującego przy pełnym wysterowaniu wynosi  $\pi/4$ , czyli około 78%. Rzeczywiste układy tego typu osiągają sprawności około 65...70%. We wzmacniaczach klasy B (w odróżnieniu od wzmacniaczy klasy A) moc pobierana z obwodów zasilających oraz moc strat zależna jest od poziomu wysterowania. Przy około 63% pełnego wysterowania moc tracona w elementach aktywnych osiąga wartość maksymalną.

Poważną wadą wzmacniaczy klasy B są zniekształcenia skrośne wynikające z nieliniowości charakterystyk wejściowych tranzystorów. Zniekształcenia te są szczególnie widoczne dla małych amplitud sygnału wejściowego (rys.3). Z tego powodu wzmacniacze pracujące w „czystej” klasie B nie są stosowane jako wzmacniacze audio. Sposobem na znaczne zmniejszenie zniekształceń skrośnych jest wstępne spolaryzowanie tranzystorów tak, aby przepływający przez nie spoczynkowy prąd  $I_{CQ}$  wynosił około 5-10% wartości maksymalnego prądu wyjściowego. Wraz ze wzrostem wartości prądu  $I_{CQ}$  maleją zniekształcenia skrośne, ale niestety maleje również sprawność energetyczna. Z tego powodu wartości  $I_{CQ}$  w typowych rozwiązaniach praktycznych wzmacniaczy średniej mocy są kompromisem między poziomem linearyzacji charakterystyki przejściowej a sprawnością i zawierają się w przedziale 20...100mA.



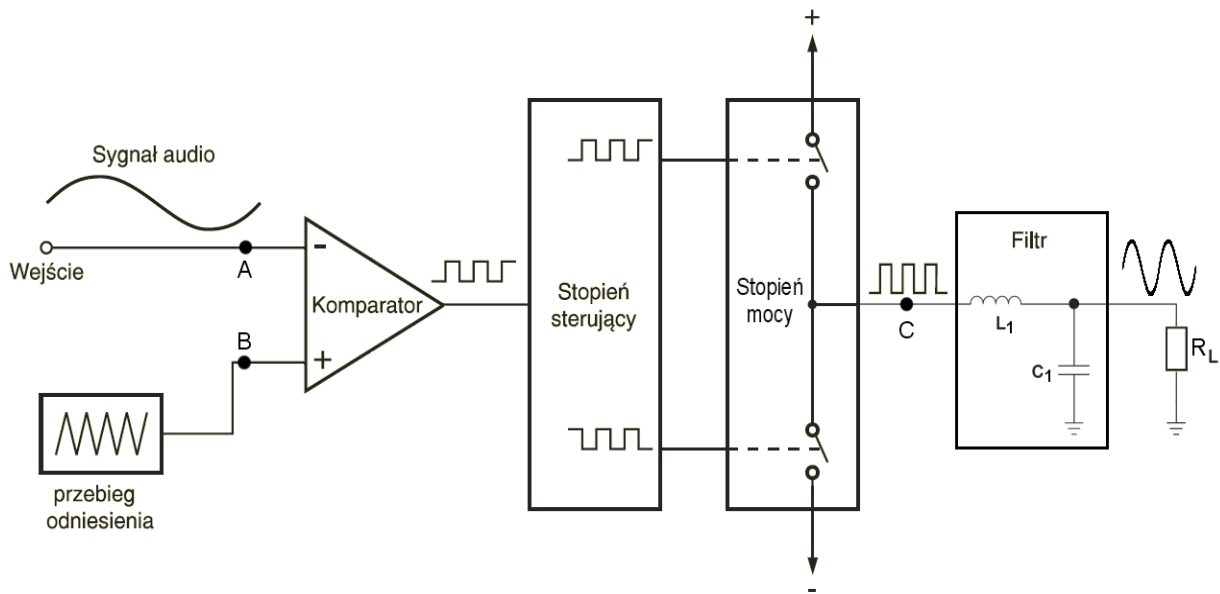
Rys.3 Charakterystyki przejściowe wzmacniaczy klas: B, AB [2]

Wstępna polaryzacja elementów aktywnych, ustalająca przepływ prądu  $I_{CQ}$  powoduje, że dla małych sygnałów wejściowych obydwa tranzystory znajdują się w stanie przewodzenia - wzmacniacz pracuje w klasie A. Wysterowanie wzmacniacza dużym sygnałem powoduje natomiast, że jeden z tranzystorów przechodzi do stanu odcięcia, a prąd płynie tylko przez drugi tranzystor - wówczas wzmacniacz pracuje jak w klasie B [3]. Wzmacniacze mocy o takiej konstrukcji zalicza się do **klasy AB** - pośredniej pomiędzy klasą A i B. Wartość kąta przepływu dla takiego układu określa nierówność:  $\pi < \Theta < 2\pi$ .

### Klasa D

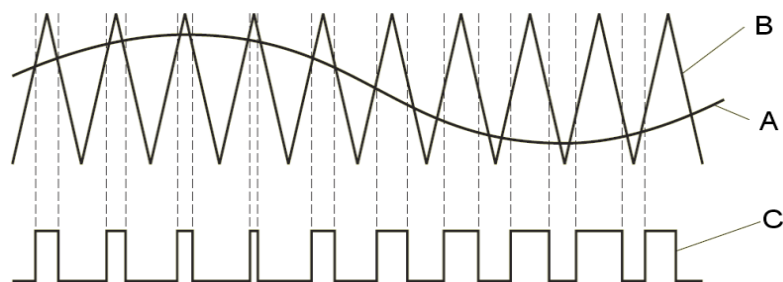
W przypadku wzmacniaczy mocy klasy D pojęcie kąta przepływu prądu traci sens, ponieważ elementy aktywne pracują dwustanowo - są przełączane pomiędzy stanem nasycenia a stanem odcięcia. Ideę pracy wzmacniacza klasy D ilustruje rys.4. Wzmacniacz mocy klasy D dokonuje konwersji wejściowego sygnału m.cz. na sygnał prostokątny o zmiennym współczynniku wypełnienia. Wartość współczynnika wypełnienia jest proporcjonalna do chwilowej amplitudy sygnału wejściowego (rys.5). Konwersja sygnału wejściowego na przebieg prostokątny o zmiennym współczynniku wypełnienia dokonywana jest przy pomocy komparatora (rys.4). Częstotliwość sygnału odniesienia jest większa od maksymalnej częstotliwości sygnału wejściowego, np. 100...300 kHz.





Rys.4 Uproszczony schemat ideowy wzmacniacza mocy klasy D [EdW 11/96]

Na podstawie sygnału uzyskanego na wyjściu komparatora w stopniu sterującym generowane są przebiegi prostokątne sterujące tranzystorami stopnia mocy. Sygnał występujący na wyjściu stopnia mocy jest odwzorowaniem sygnału wyjściowego komparatora - posiada tę samą wartość współczynnika wypełnienia, ale znacznie większą amplitudę (równą sumie napięć zasilających stopień mocy). Za pomocą wyjściowego filtra dolnoprzepustowego LC z sygnału wyjściowego stopnia mocy odfiltrowywane są składowe o wyższych częstotliwościach, a wzmacniony sygnał wejściowy.



Rys.5 Przebiegi napięć w punktach A, B, C wzmacniacza klasy D z rys.4 [EdW 11/96]

Teoretyczna sprawność wzmacniacza mocy pracującego w klasie D wynosi 100%. Rzeczywiste układy osiągają sprawności z przedziału 70...90%. Sprawność wzmacniacza klasy D zależy od dwóch grup czynników: strat mocy w elementach aktywnych stopnia mocy oraz od strat mocy w wyjściowym filtrze LC.

Na straty mocy w elementach aktywnych składają się: straty wynikające z przepływu prądu przez element będący w stanie przewodzenia oraz straty mocy występujące przy przełączaniu tranzystorów [3].

Straty mocy występujące w wyjściowym filtrze LC związane są bezpośrednio z parametrami zastosowanych elementów: współczynnikiem strat ( $\text{tg}\delta$ ) pojemności oraz rezystancją szeregową indukcyjności.

Zniekształcenia harmoniczne i intermodulacyjne wprowadzane przez wzmacniacze klasy D, w porównaniu do wzmacniaczy klas A i AB, są dosyć znaczne - rzędu 1%. Zastosowanie dodatkowych pętli sprzężenia zwrotnego oraz odpowiedni dobór elementów pozwala, kosztem skomplikowania układu, na osiąganie w tego typu konstrukcjach zniekształceń poniżej 0,1%.

Poziom wprowadzanych zniekształceń zależy od:

- częstotliwości przebiegu odniesienia - wzrost częstotliwości przebiegu odniesienia powoduje zmniejszenie poziomu zniekształceń, ale z drugiej strony powoduje wzrost strat związanych z przełączaniem tranzystorów stopnia mocy,
- dynamicznych parametrów tranzystorów stopnia mocy - czasów włączania i wyłączenia,
- zmian parametrów elementów wyjściowego filtra w funkcji prądu (L) i częstotliwości (C).

## 2. Opis badanych układów

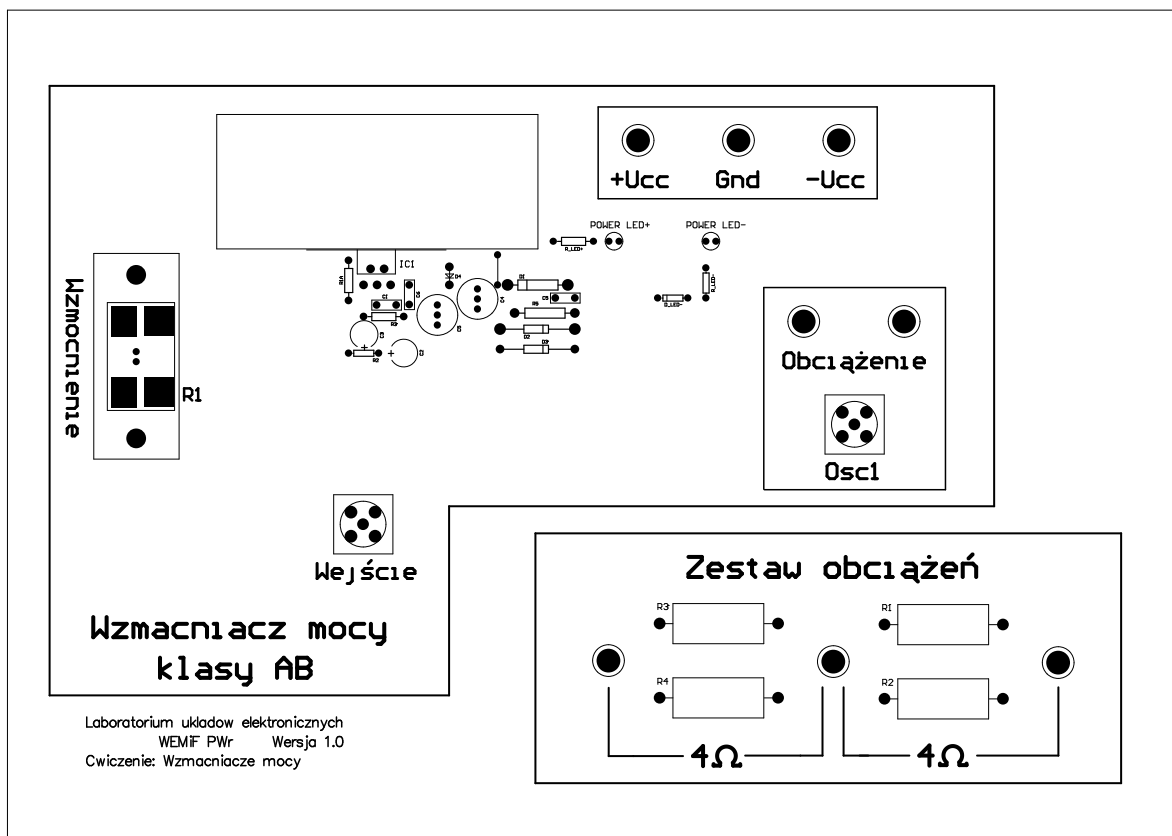
Na stanowisku pomiarowym znajdują się trzy makiety opisane „Wzmacniacz mocy klasy ...” przeznaczone do pomiarów parametrów wzmacniaczy klas: AB, B i D.

### 2.1. Wzmacniacz mocy klasy AB

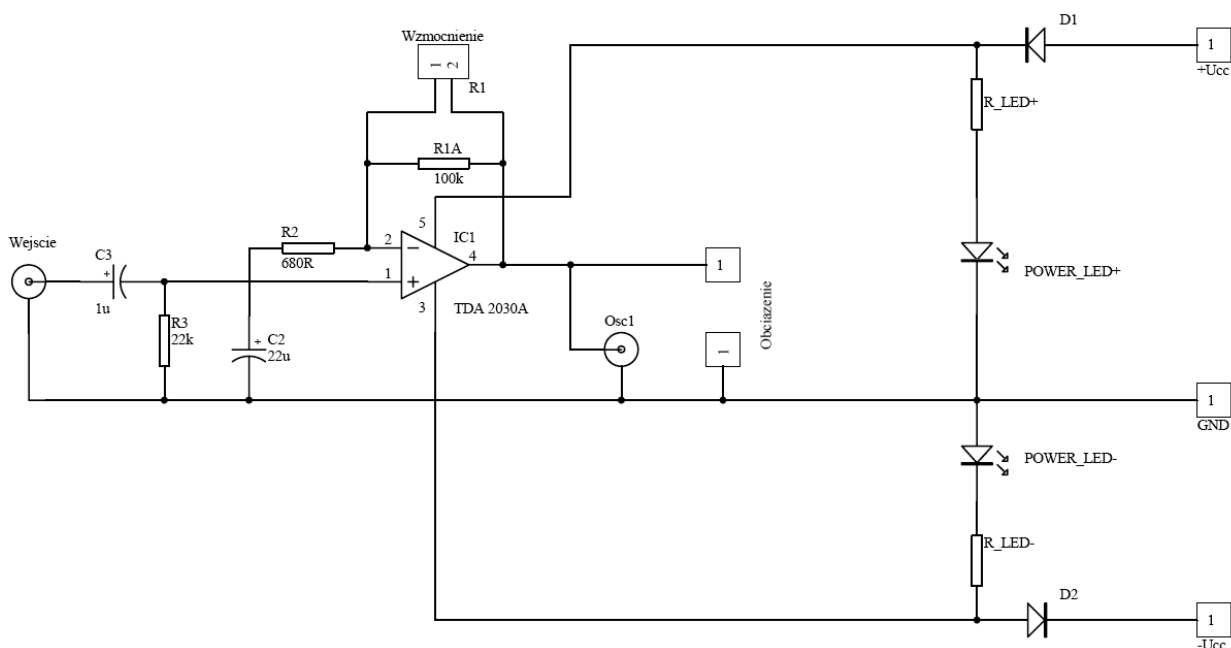
Poglądowy szkic makiety przedstawiono na rys.6. Na makiecie znajduje się: **wzmacniacz mocy klasy AB** zbudowany przy użyciu popularnego układu TDA 2030 (rys.7) oraz **zestaw obciążeń** ( $2 \times 4\Omega$ ) w postaci rezystorów dużej mocy. Maksymalna moc admisyjna pojedynczego obciążenia  $4\Omega$  wynosi 10W.

Makieta wzmacniacza mocy klasy AB wymaga symetrycznego napięcia zasilającego o maksymalnej wartości równej  $\pm 10V$ . Napięcie zasilające należy doprowadzić do zacisków: **+Ucc**, **Gnd**, **-Ucc** (rys.9, rys.10). Jako źródło sygnału wejściowego dla

wzmacniacza należy wykorzystać generator sygnałowy i przyłączyć go do gniazda **Wejście**. Obciążenie wzmacniacza należy podłączyć do zacisków **Obciążenie** (zacisk koloru czarnego dołączony jest do potencjału masy, **GND**).



Rys.6 Makieta pomiarowa wzmacniacza mocy klasy AB



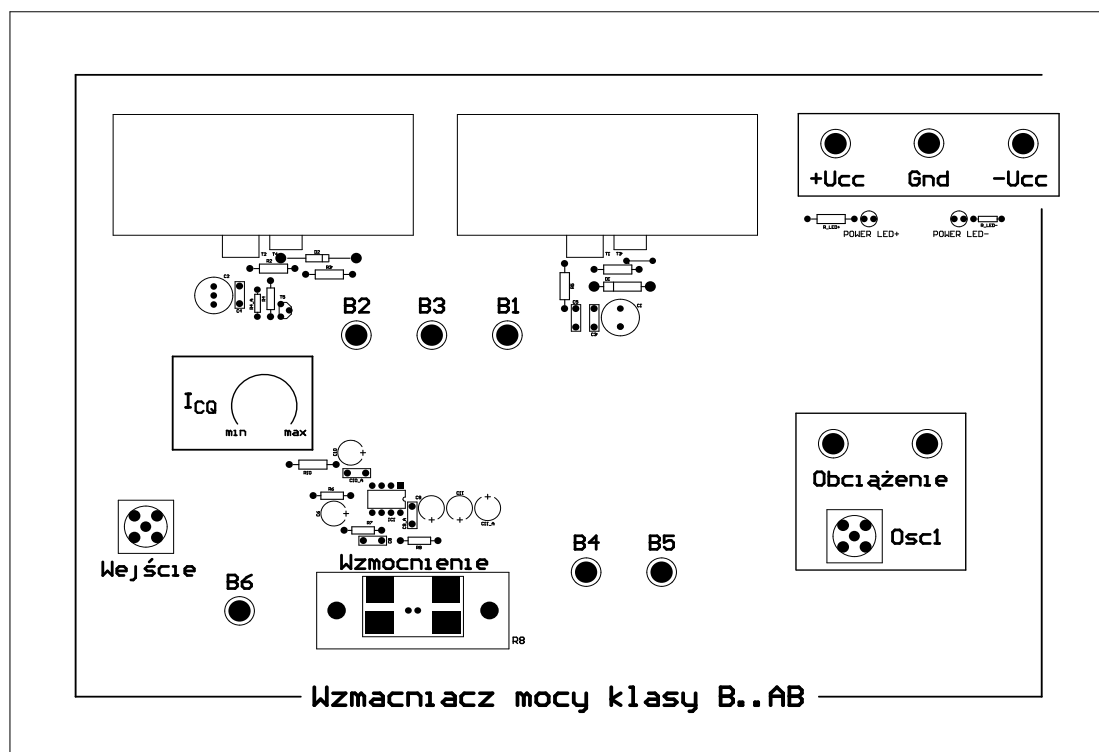
Rys.7 Uproszczony schemat elektryczny makiety wzmacniacza klasy AB

Gniazdo **Osc1** służy do podłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia wyjściowego wzmacniacza. Wzmocnienie napięciowe układu (w zakresie średnich częstotliwości, 1kHz) wynosi około 147 V/V. Zmiany wzmocnienia napięciowego układu (wyłącznie zmniejszenie wzmocnienia) można dokonać przez umieszczenie dodatkowej rezystancji  $R_1$  w gnieździe **Wzmocnienie**. Wzmocnienie układu określone jest zależnością:

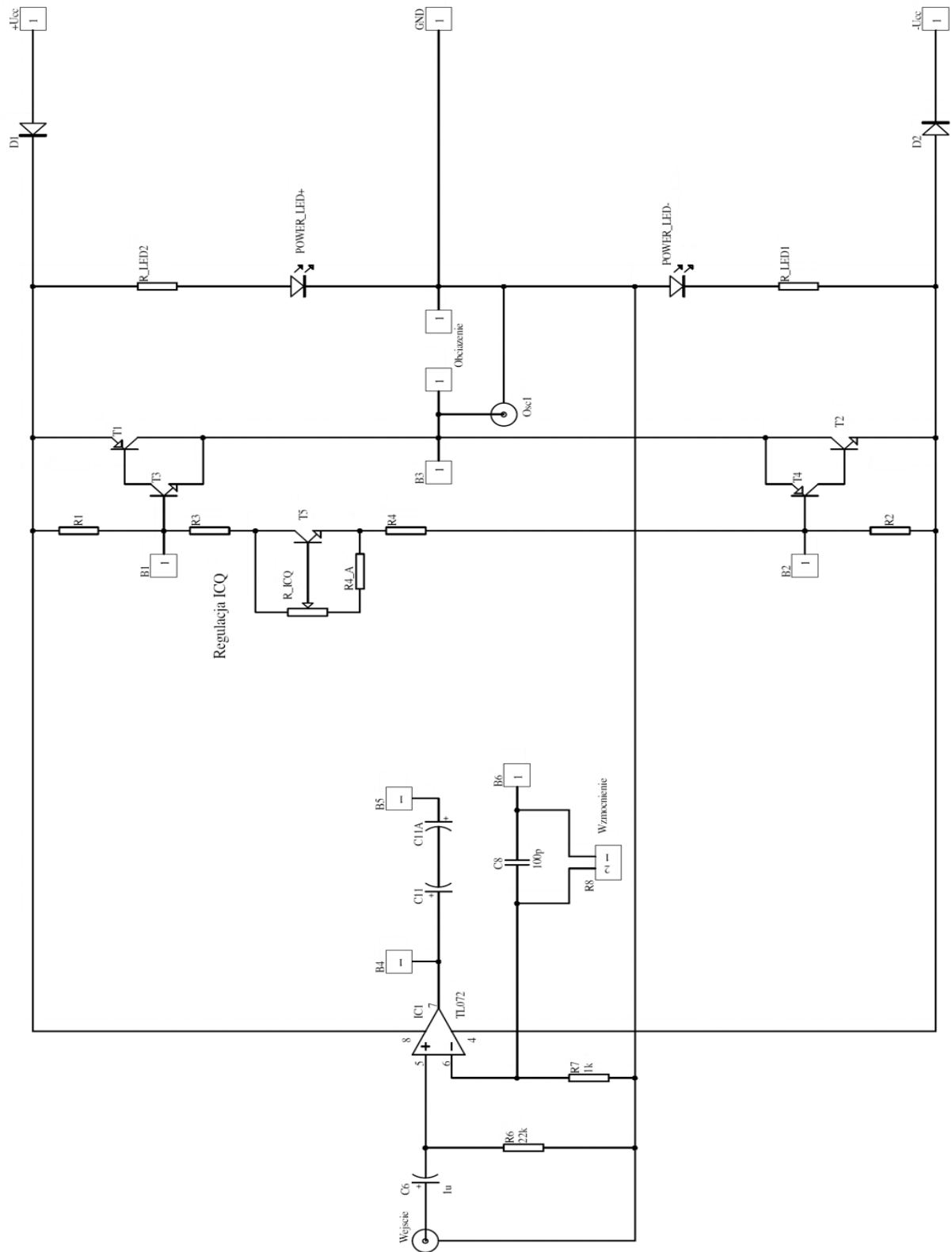
$$k_u = \frac{R_1 \parallel R_{1A}}{R_2} + 1 = \frac{R_1 \parallel 100k\Omega}{680\Omega} + 1 \quad (3.7)$$

## 2.2. Wzmacniacz mocy B...AB

Widok makiety wzmacniacza klasy B...AB przedstawiono na rys.8. Układ wzmacniacza znajdujący się na mackiecie składa się z dwóch zasadniczych bloków: wzmacniacza napięciowego zbudowanego przy użyciu wzmacniacza operacyjnego TL072 oraz wzmacniacza prądowego zbudowanego z elementów dyskretnych (rys.9). Wzmacniacz prądowy posiada możliwość regulacji spoczynkowego prądu płynącego przez elementy aktywne (tranzystory  $T_1$ ,  $T_2$ ). Regulacji tej dokonuje się potencjometrem  $I_{CQ}$ . Mackieta wymaga symetrycznego napięcia zasilającego o maksymalnej wartości równej  $\pm 10V$ . Napięcie zasilające należy doprowadzić do zacisków: **+Ucc**, **Gnd**, **-Ucc**.



Rys.8 Mackieta pomiarowa wzmacniacza mocy klasy B

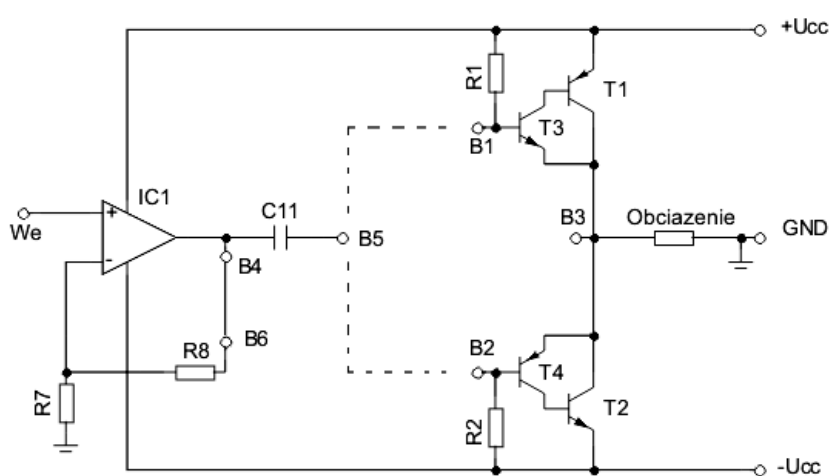


Rys.9 Uproszczony schemat elektryczny makiety wzmacniacza klasy B

Jako źródło sygnału wejściowego dla wzmacniacza należy wykorzystać generator sygnałowy i przyłączyć go do gniazda **Wejście**. Obciążenie wzmacniacza należy dołączyć do zacisków **Obciążenie** (zacisk koloru czarnego dołączony jest do potencjału masy, **GND**). Gniazdo **Osc1** służy do podłączenia oscyloskopu i obserwacji napięcia wyjściowego wzmacniacza.

Złącza B1...B6 umożliwiają połączenie bloku wzmacniacza napięciowego i bloku wzmacniacza prądowego w dwie konfiguracje: 1) układ bez sprzężenia zwrotnego (rys.10a), 2) układ ze sprzężeniem zwrotnym (rys.10b).

a)

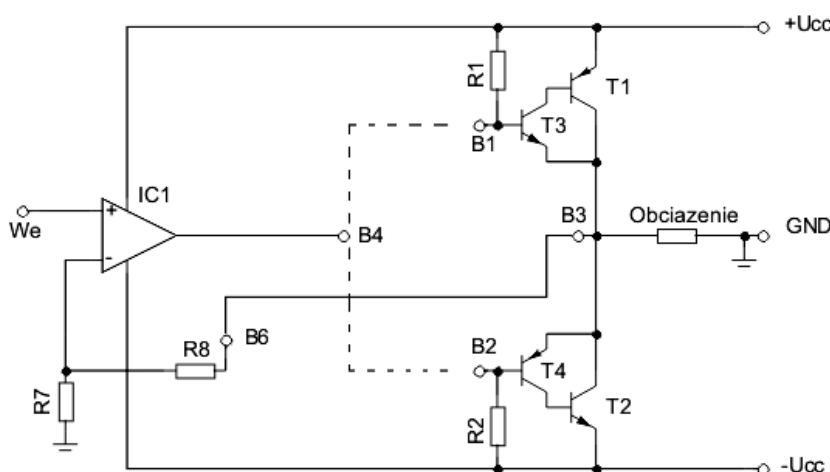


Linia przerywana ilustruje możliwe połączenia wzmacniacza napięciowego ze wzmacniaczem prądowym:  
**B5-B1** lub **B5-B2**

**Uwaga:**

Dla tej konfiguracji układu konieczne jest połączenie **B4-B6**

b)



Linia przerywana ilustruje możliwe połączenia wzmacniacza napięciowego ze wzmacniaczem prądowym:  
**B4-B1** lub **B4-B2**

**Uwaga:**

Dla tej konfiguracji układu konieczne jest połączenie **B3-B6**

Rys.10 Możliwe konfiguracje układowe wzmacniacza klasy B: a) bez sprzężenia zwrotnego, b) ze sprzężeniem zwrotnym

Blok wzmacniacza napięciowego nie posiada ustalonego wzmocnienia. Wzmocnienie to należy przed pomiarami ustalić przez umieszczenie dodatkowej

rezystancji  $R_8$  w gnieździe **Wzmocnienie**. W zakresie średnich częstotliwości (1kHz) wzmocnienie układu określone jest zależnością:

$$k_u = \frac{R_8}{R_7} + 1 = \frac{R_8}{1k\Omega} + 1 \quad (3.8)$$

### 2.3. Wzmacniacz mocy klasy D

Ogólny widok makiety pomiarowej wzmacniacza klasy D przedstawia rys.11. Makieta ta wymaga pojedynczego napięcia zasilającego o wartości równej **+15V**. Napięcie zasilające należy doprowadzić do zacisków: **+Ucc** oraz **Gnd** (rys.11, rys.12). Na makiecie znajduje się stabilizator ustalający **napięcie zasilające układ wzmacniacza na poziomie 12V**. Jako źródło sygnału wejściowego dla wzmacniacza należy wykorzystać generator sygnałowy i przyłączyć go do gniazda **Wejście**.

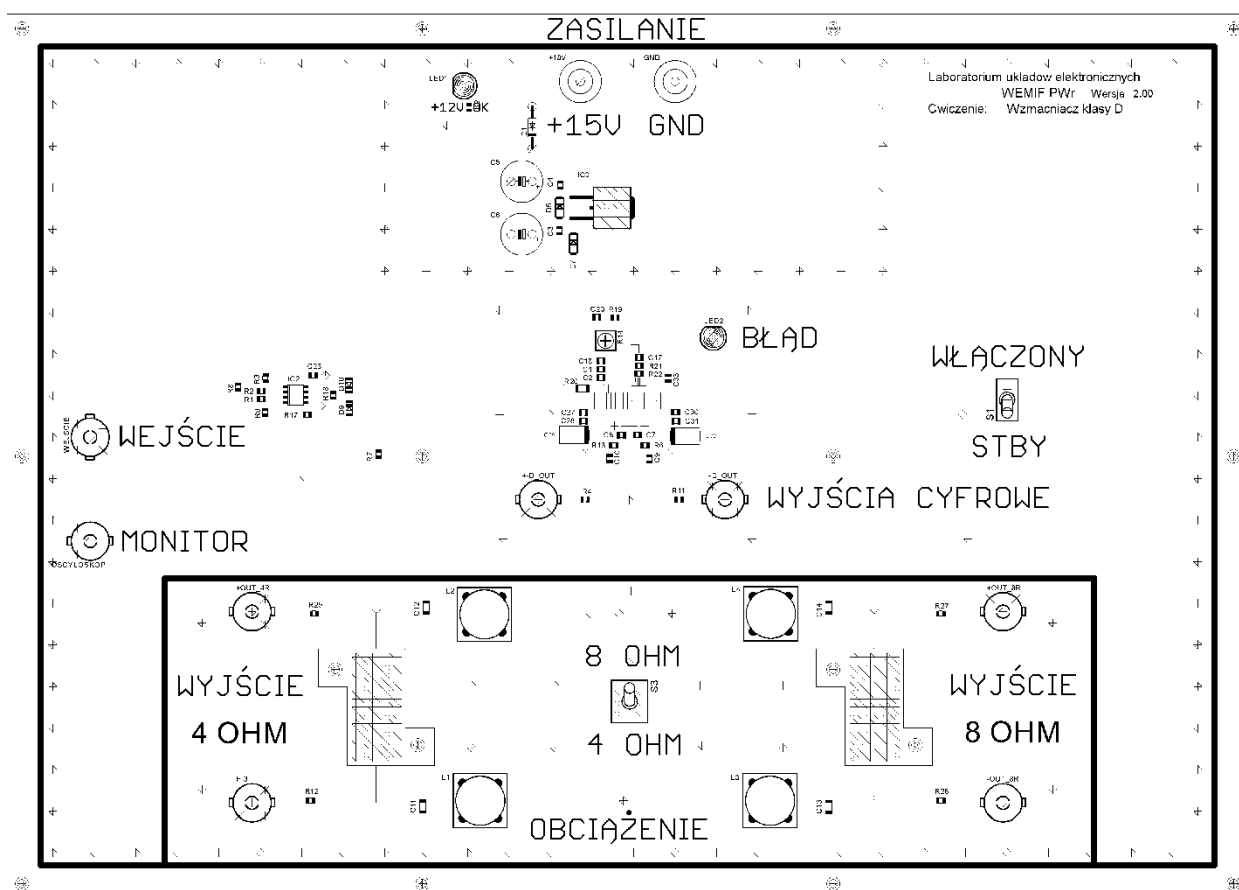
Na makiecie znajduje się przelącznik „**WŁĄCZONY / STBY**”, przy pomocy którego można załączać układ, lub przechodzić w stan uśpienia (tzw. **STANDBY**). Na makiecie znajduje się także dioda LED sygnalizująca błąd w pracy wzmacniacza, powodowany np. przekroczeniem dopuszczalnej temperatury pracy układu.

Obciążenie wzmacniacza w formie rezystorów o rezystancji  $4\Omega$  oraz  $8\Omega$  znajduje się bezpośrednio na makiecie. Rezystancję obciążenia można wybrać przy użyciu przelącznika „**4 OHM / 8 OHM**”. Wyjścia zastosowanego na makiecie wzmacniacza mocy zrealizowane są w tzw. **układzie mostkowym** - oznacza to, że żadne z wyprowadzeń obciążenia **nie jest połączone z potencjałem masy!** Na każdym z wyjść wzmacniacza **występuje względem masy stałe napięcie** o wartości równej w przybliżeniu połowie napięcia zasilającego układ wzmacniacza, a użyteczny sygnał wyjściowy występujący na tych wyprowadzeniach jest przesunięty w fazie o  $180^\circ$ . Dzięki takiemu rozwiązaniu wypadkowa wartość składowej stałej występującej na obciążeniu ma wartość równą zero, a składowa zmienna ma amplitudę dwukrotnie większą niż na pojedynczym wyprowadzeniu liczoną względem masy układu.

**W związku z powyższym pomiary sygnału wyjściowego należy prowadzić, wykorzystując osobne przewody dla każdego półmostka, mierząc sygnał z obu półmostków oddzielnie na dwóch kanałach oscyloskopu. Wartość całkowitego sygnału wyjściowego występującego na obciążeniu można zmierzyć odejmując sygnały z obu**

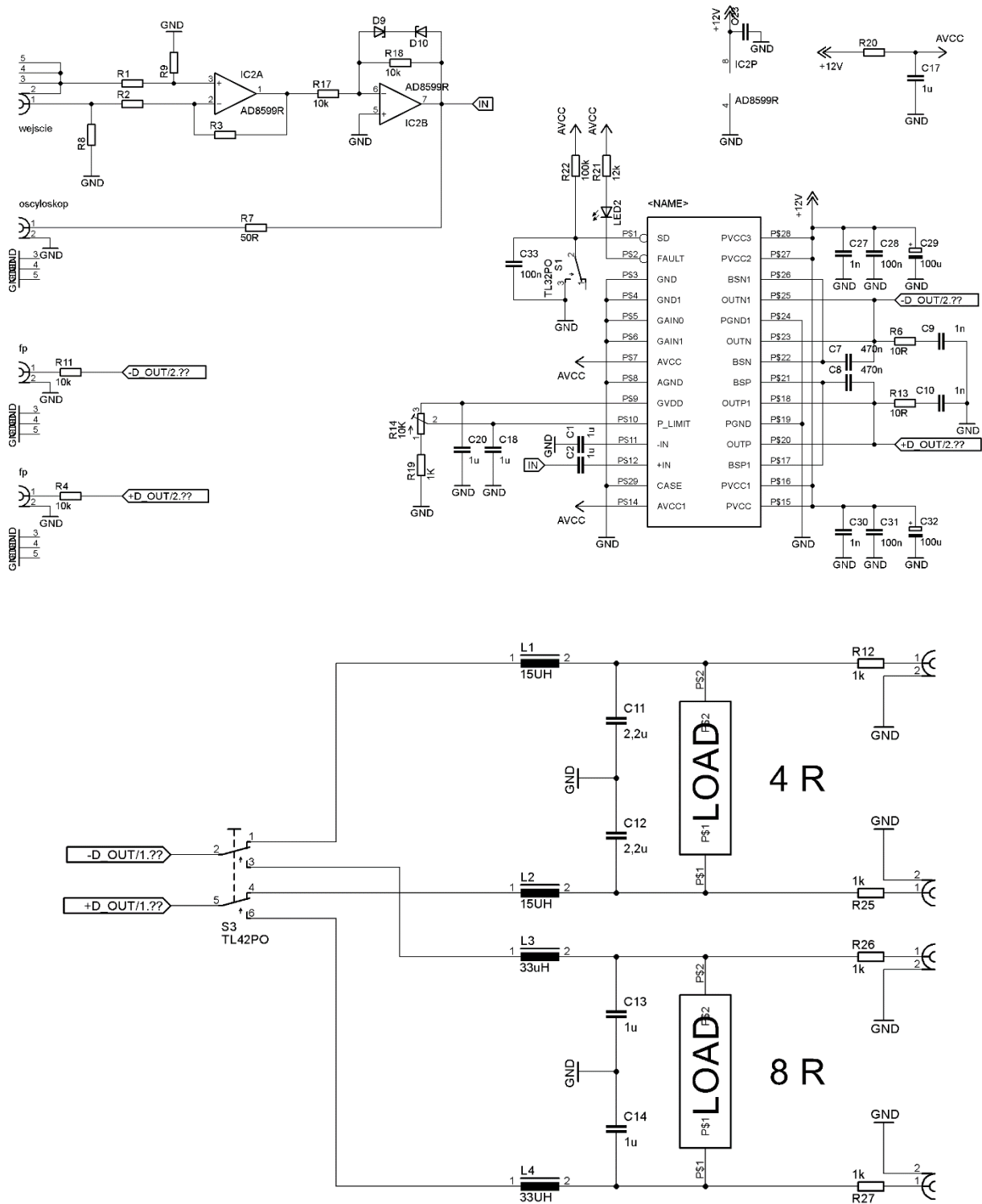
półmostków wykorzystując opcję "MATH" w oscyloskopie. Miernik zniekształceń wyposażony jest w wejście różnicowe (samoczynnie odejmuje dwa sygnały od siebie), więc wystarczy do jego wejścia wprowadzić sygnał z obu półmostków przy użyciu specjalnego przewodu pomiarowego 2x BNC na 2x BANAN (przewód znajduje się na stanowisku).

Sygnały występujące bezpośrednio na wyjściu każdego z półmostków wzmacniacza można obserwować po podłączeniu oscyloskopu do gniazd Oznaczonych jako „WYJŚCIA CYFROWE” - możliwe jest tu zaobserwowanie dynamicznych zmian współczynnika wypełnienia sygnału wyjściowego ze stopnia mocy. Sygnały występujące na obciążeniu (po przejściu przez filtr dolnoprzepustowy) można obserwować na zaciskach oznaczonych jako „WYJŚCIE 8 OHM” lub „WYJŚCIE 4 OHM” - należy zwrócić uwagę, na odpowiednie ustawienie przełącznika „4 OHM / 8 OHM”.



Rys.11 Makieta pomiarowa wzmacniacza mocy klasy D





Rys.12 Uproszczony schemat elektryczny makiety wzmacniacza mocy klasy D

### 3. Projekt

Do ćwiczenia **Wzmacniacze mocy** studenci nie przygotowują zadania domowego.

### 4. Program ćwiczenia

Zakres wykonywanych w ćwiczeniu pomiarów określa, spośród przedstawionych poniżej propozycji, **Prowadzący** zajęcia.

#### 4.1. Pasmo przenoszenia mocy

Pomiarów pasma przenoszenia mocy monolitycznego wzmacniacza klasy AB należy dokonać dla dwóch wartości wzmocnienia napięciowego  $k_u$ : maksymalnego ( $R_1 = \infty$ ) i około 10 razy mniejszego - wyznaczyć wartość rezystancji  $R_1$  z zależności (3.7).

- Pomiarów należy przeprowadzić dla obciążenia  $8 \Omega$  przy napięciu zasilającym równym  $\pm 10V$ ,
- Poziom sygnału wejściowego dobrać tak, aby dla  $f_{GEN} = 1kHz$  uzyskać w sygnale wyjściowym wzmacniacza  $THD+N \approx 3\%$  (pomiar THD+N - patrz p.5),
- Częstotliwość sygnału wejściowego zmieniać począwszy od 10 Hz następująco: 10, 50, 80, 100, 500, 800, 1 kHz itd,
- Moc wyjściową należy obliczać na podstawie pomiaru wartości skutecznej napięcia wyjściowego oscyloskopem (nie na podstawie pomiaru amplitudy i przeliczaniu na wartość skuteczną),
- Charakterystyki  $P_{WY} = f(f_{GEN})$  dla obydwu wzmocnień sporządzić we wspólnym, pół-logarytmicznym układzie współrzędnych i dla każdej z nich określić pasmo przenoszenia mocy podając górne i dolne częstotliwości graniczne,
- W sprawozdaniu napisać wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

#### 4.2. Znamionowa moc wyjściowa

Pomiarów znamionowej mocy wyjściowej  $P_{WY\_ZN}$  monolitycznego wzmacniacza klasy AB należy dokonać w funkcji wartości napięcia zasilającego  $U_{CC}$  dla dwóch poziomów zniekształceń nieliniowych sygnału wyjściowego **THD+N**, np. 5 i 10%.

- Pomiarów należy przeprowadzić dla obciążenia  $8\ \Omega$ , częstotliwości sygnału wejściowego równej  $f_{GEN}=1\ \text{kHz}$  i wzmocnienia napięciowego około  $50\ \text{V/V}$  (wyznaczyć wartość rezystancji  $R_1$  z zależności 3.7).
- Napięcie zasilające zmieniać w zakresie od  $\pm 4$  do  $\pm 10\ \text{V}$  z krokiem  $2\ \text{V}$ ,
- Poziom sygnału wejściowego należy, dla każdej wartości napięcia zasilającego, ustalać tak, aby uzyskać określony poziom zniekształceń **THD+N** sygnału wyjściowego (pomiar THD+N - patrz p.5),
- Moc wyjściową należy obliczać na podstawie pomiaru wartości skutecznej napięcia wyjściowego oscyloskopem (nie na podstawie pomiaru amplitudy i przeliczaniu na wartość skuteczną),
- Sporządzić charakterystykę  $P_{WY\_ZN}=f(U_{CC})$ ,
- W sprawozdaniu napisać wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

#### 4.3. Współczynnik zniekształceń harmonicznym THD+N w funkcji mocy wyjściowej wzmacniaczy klas AB i D

Pomiarów współczynnika zniekształceń harmonicznym **THD+N** dla monolitycznego wzmacniacza mocy klas AB i D należy dokonać w funkcji mocy wyjściowej  $P_{WY}$  dla obciążenia  $8\ \Omega$ .

- Napięcie zasilające dla wzmacniacza klasy AB ustalić na  $\pm 10\ \text{V}$ , natomiast makietę wzmacniacza klasy D zasiląć napięciem  $+15\ \text{V}$ ,
- Częstotliwość sygnału wejściowego ustalić na  $f_{GEN}=1\ \text{kHz}$ ,
- Pomiarów należy rozpocząć od takiej wartości sygnału z generatora, dla której poziom zniekształceń sygnału wyjściowego wzmacniacza wynosił będzie  $10\%$ ,
- Pomiarów należy prowadzić sukcesywnie zmniejszając poziom sygnału z generatora. Punktem końcowym pomiarów jest: 1) taka wartość sygnału, dla której miernik THD przestanie wyświetlać wynik lub 2) osiągnięcie minimalnej wartości sygnału wyjściowego z generatora,
- Moc wyjściową wzmacniacza należy obliczać na podstawie pomiaru wartości skutecznej napięcia wyjściowego oscyloskopem (nie na podstawie pomiaru amplitudy i przeliczaniu na wartość skuteczną),

- Przystępując do pomiarów mocy wyjściowej wzmacniacza klasy D należy dokładnie zapoznać z jego cechami opisanymi w punkcie 2.3 (**układ mostkowy**).
- Charakterystyki  $THD+N=f(P_{wy})$  dla obydwu wzmacniaczy sporządzić w jednym układzie współrzędnych,
- W sprawozdaniu napisać wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

#### 4.4. Współczynnik zniekształceń harmoniczných THD+N dyskretnego wzmacniacza mocy klasy AB

Pomiarów współczynnika zniekształceń harmoniczných **THD+N** (pomiarы THD+N - patrz p.5) dla dyskretnego wzmacniacza mocy klasy AB należy dokonać w funkcji spoczynkowego prądu elementów aktywnych w układzie z rys.10a. Pomiarы należy przeprowadzić dla wzmocnienia napięciowego mniejszego niż 10 V/V, obciążenia 8Ω, napięcia zasilającego ±10V i częstotliwości sygnału wejściowego  $f_{GEN}=1kHz$ .

- Spoczynkowy prąd elementów aktywnych regulować potencjometrem  $I_{CQ}$ . Wartość prądu odczytywać na zasilaczu przy odłączonym sygnale wejściowym,
- Sporządzić charakterystykę  $THD+N=f(I_{CQ})$ .
- W sprawozdaniu napisać wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

#### 4.5. Zniekształcenia skrośne w dyskretnym wzmacniaczu klasy AB

- Połączyć układ dyskretnego wzmacniacza klasy AB w konfiguracji z rys.10a, ustalając wzmocnienie napięciowe mniejsze niż 10 V/V,
- Makietę wzmacniacza zasilić napięciem ±10V,
- Częstotliwość sygnału wejściowego ustalić na  $f_{GEN}=1kHz$ ,
- Potencjometrem  $I_{CQ}$  ustalić minimalny prąd spoczynkowy elementów aktywnych,
- Dobrać amplitudę sygnału wejściowego tak, aby na wyjściu wzmacniacza zaobserwować efekt występowania zniekształceń skrośnych - charakterystyczny kształt sygnału pokazany na rys.3. Zarejestrować uzyskany przebieg. Zmieniając ustawienie potencjometru  $I_{CQ}$  doprowadzić do wyeliminowania w sygnale wyjściowym efektu zniekształceń skrośnych - zarejestrować przebieg.
- Połączyć układ wzmacniacza AB w konfiguracji z rys.10b,

- Potencjometrem  $I_{CQ}$  ustalić minimalny prąd spoczynkowy elementów aktywnych. Zarejestrować przebieg wyjściowy,
- Zarejestrowane przebiegi dołączyć do sprawozdania,
- W sprawozdaniu wyjaśnić, dlaczego z układzie z rys.10b zniekształcenia skrośne nie występują pomimo braku wstępnej polaryzacji.

#### 4.6. Sprawność wzmacniaczy mocy klas AB i D

Pomiarów sprawności monolitycznych wzmacniaczy klas AB i D należy dokonać w funkcji mocy wyjściowej  $P_{WY}$  dla obciążenia  $8\Omega$  i częstotliwości sygnału wejściowego  $f_{GEN}=1kHz$ .

- Napięcie zasilające wzmacniacza klasy AB ustalić na  $\pm 10V$ , natomiast makietę wzmacniacza klasy D zasiląć napięciem  $+15V$ ,
- Pomiarów należy rozpocząć od takiej wartości sygnału z generatora, dla której poziom zniekształceń sygnału wyjściowego wzmacniacza wynosił będzie 10%,
- Pomiarów należy prowadzić sukcesywnie zmniejszając poziom sygnału z generatora. Punktem końcowym pomiarów jest najmniejszy poziom sygnału, jaki pozwala ustalić generator,
- Moc wyjściową należy obliczać na podstawie pomiaru wartości skutecznej napięcia wyjściowego wzmacniacza oscyloskopem (nie na podstawie pomiaru amplitudy i przeliczaniu na wartość skuteczną),
- Przystępując do pomiarów mocy wyjściowej wzmacniacza klasy D należy dokładnie zapoznać z jego cechami opisanymi w punkcie 2.3 (**układ mostkowy**).
- Moc pobieraną z zasilania należy obliczać:
  - wzmacniacz klasy AB: jako iloczyn całkowitego napięcia zasilającego (20V) i prądu zasilającego odczytanego z zasilacza,
  - wzmacniacz klasy D: jako iloczyn napięcia zasilającego układ scalony wzmacniacza (12V) i prądu zasilającego odczytanego z zasilacza,
- Charakterystyki  $\eta=f(P_{WY})$  dla obydwu wzmacniaczy sporządzić w jednym układzie współrzędnych,
- W sprawozdaniu napisać wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

## 5. Wykaz aparatury i przyrządów pomiarowych

- trzy makiety pomiarowe
- oscyloskop cyfrowy
- cyfrowy generator sygnałowy
- zestaw zasilaczy
- dwa multimetry
- miernik RLC
- miernik THD - Keithley 2015 - ustawienie przyrządu do pomiaru zniekształceń harmoniczných: wcisnąć **SHIFT**, po czym **ACV(THD)**. Następnie wcisnąć klawisz **MEAS(SETUP)** i przy pomocy klawiszy **<** **>** oraz **^** **v** wybrać opcję **THD+N**. Wybór zatwierdzić klawiszem **ENTER**. Wynik pomiaru wyświetlany jest w %.